

Může příliš mnoho chladiv v jaderném reaktoru vadit?

L. Gavlová*, T. Havlíček**, J. Kožnar***

*PORG Ostrava, **První české gymnázium v Karlových Varech, ***
Střední průmyslová škola Třebíč

*gavlovalucie@porg.cz, **theodorhavlicek@gmail.com, ***
koznarj.04@spst.eu

Abstrakt:

Jaderné reaktory jsou v dnešním světě klíčovými zdroji energie, jejich návrh a konstrukce je náročná a každá změna v designu může vést k dosti odlišným výsledkům. V našem miniprojektu jsme se zabývali roztečí jednotlivých palivových proutků a hledali její optimální hodnotu z hlediska moderačních a absorpčních vlastností moderátoru. Dále byl otestován vliv různých typů moderátoru na reaktivitu reaktoru.

1. Úvod

Jaderné reaktory jsou klíčovými zdroji energie. Využívají principu štěpení těžkých jader uranu za přítomnosti moderátoru. Moderátor je využit pro zpomalení rychlých neutronů na úroveň tepelných neutronů, čímž se zvyšuje pravděpodobnost absorpce a následného rozštěpení jádra ^{235}U . Jako palivo se nejčastěji využívají směs ^{238}U obohaceného o ^{235}U do 5%.

Pro popis míry štěpení se využívá veličina jménem koeficient násobení, jež lze vyjádřit poměrem mezi počtem neutronů současné generace N_i a předchozí generace N_{i-1} :

$$k_{ef} = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

Rozlišujeme 3 stavy štěpení:

$k_{ef} = 1$ → kritický stav – zánik a vznik nových neutronů je v rovnováze

$k_{ef} > 1$ → nadkritický stav – vzniká více nových neutronů, než-li zaniká

$k_{ef} < 1$ → podkritický stav – zaniká více neutronů, než-li vzniká

Během štěpné reakce dochází vlivem absorpce neutronu jádrem těžkého atomu (například uranu) k rozštěpení jádra a současně k emisi dalších 2-3 neutronů. Tahle skutečnost umožňuje vznik tzv. řetězové štěpné reakce, tedy využití nově emitovaných neutronů k opětovné iniciaci štěpení dalších jader. Neutrony vzniklé při rozštěpení atomu dosahují velkých energií (střední hodnoty 2 MeV), což je činí nevhodné pro další rozvoj reakce, vhodné jsou především neutrony o nízkých energiích. Pravděpodobnost štěpení roste s klesající energií neutronu. Právě přechod nově vzniklých neutronů na neutrony pomalé, tzv. „tepelné“ zajišťuje moderátor, což je látka skládající se ideálně z lehkých jader, hmotnostně podobných neutronu, díky čemuž je kinetická energie rychlého neutronu účinně snížena za pomoci srážek s okolím. Takto zpomalené neutrony mají větší šanci pro rozštěpení dalších atomů.

2. Popis zadání

Pro výpočty optimálních vzdáleností proutků byl využit Monte Carlo transportní kód Serpent 2 a knihovnu jaderných dat ENDF/B-VIII.0. Tento program je využíván pro stanovování kritičnosti v reaktorové fyzice.

Jako moderátor byly v tomto miniprojektu uvažovány 4 možné látky: H_2O , D_2O , směs H_2O a D_2O v poměru 1:1 a grafit, což jsou nejčastěji využívané moderátory pro provoz jaderných reaktorů určených na výrobu elektrické energie.

Na výpočet bylo použito obohacení ^{238}U o 4,38 % ^{235}U , jež se používá například v jaderné elektrárně Dukovany. Průměr proutků byl stanoven na 0,76 cm, stejně jako v elektrárně Dukovany [1].

Ve všech případech byla uvažována hustota vztažená k teplotě 300 K (viz. Tabulka č.1)

Moderační látka	Hustota (g/cm^3) při teplotě 300 K
H_2O	1,00
D_2O	1,11
směs H_2O a D_2O , 1:1	1,05
grafit	2,20

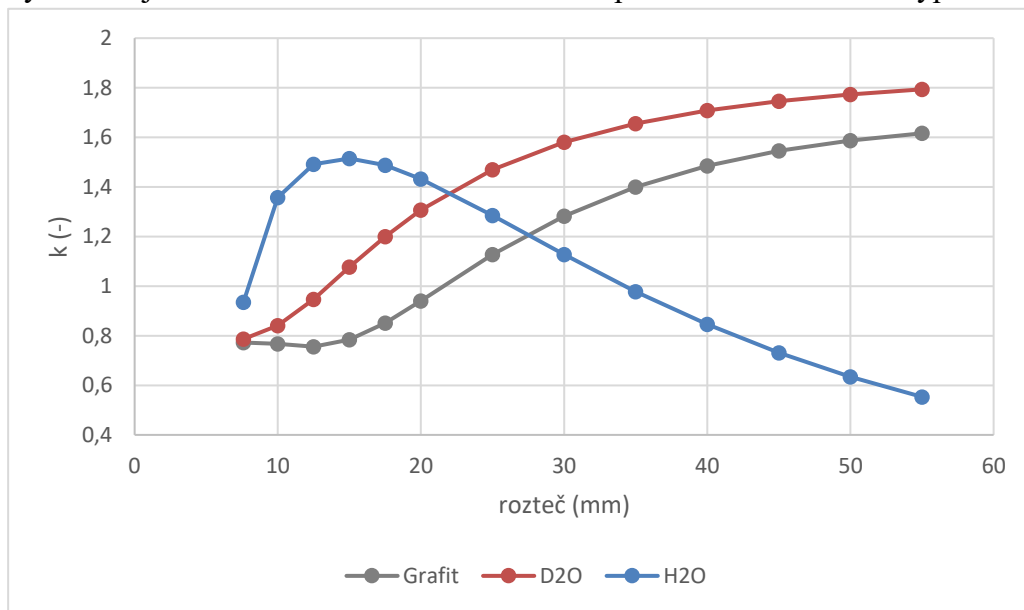
Tabulka č. 1 [2]

3. Průběh výpočtů

Dohromady byly provedeny čtyři série výpočtů, při každé sérii byl využit jiný typ moderátoru viz tabulka č.1. V programu Serpent byly navoleny jednotlivé izotopy, ze kterých se zkoumaný moderátor skládá, k nim byl uveden jejich atomový poměr v molekule. Všechny parametry jsme zachovávali konstantní, kromě rozteče mezi palivovými proutky, jejich vzdálenost jsme variovali na intervalu od 7,6 mm do 55 mm.

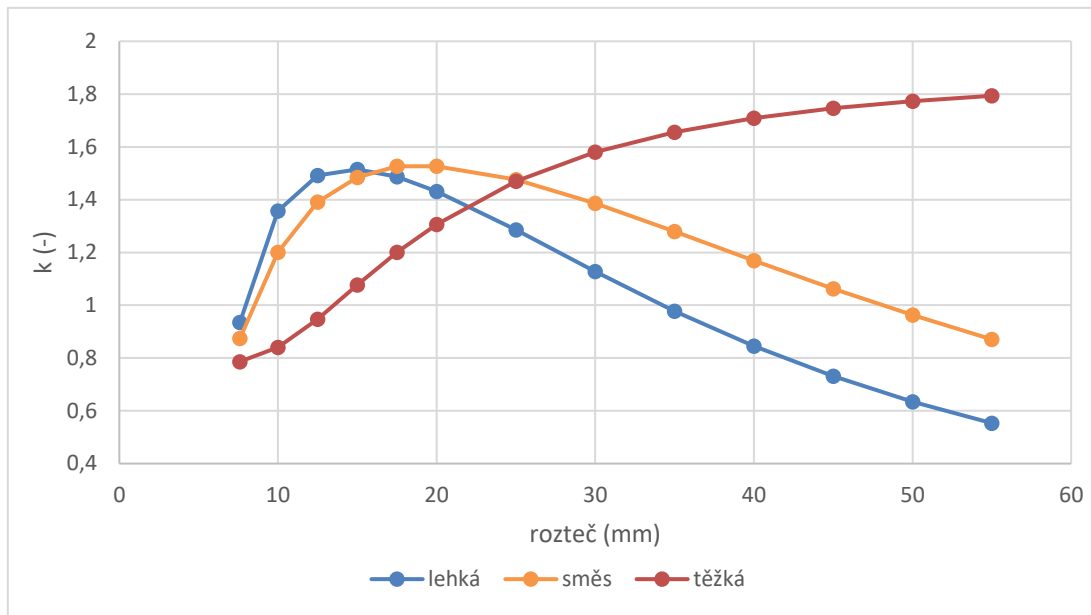
Výpočtem byly získány hodnoty koeficientu násobení, které byly zaneseny do grafu č.1 a č. 2. Obměnou typu moderátoru jsme získaly charakteristiku vše čtyř uvažovaných materiálů, které bylo možno mezi sebou porovnat.

Pro malé rozteče se jako nejlepším moderátorem jeví lehká voda, z důvodu, že lehká voda potřebuje nejméně srážek k termalizaci neutronu, viz graf č. 1. Nicméně po jisté době u lehké vody převládnu absorpční schopnosti a koeficient násobení klesá. Oblast před maximem, kde převládají termalizační účinky, se nazývá podmoderovaná a oblast za maximem se nazývá přemoderovaná. To neplatí pro těžkou vodu a grafit, kde jsou absorpční schopnosti minimální. Pro velké rozteče nejlépe vychází těžká voda, která se využívá jako moderátor v reaktorech s přírodním uranem typu CANDU.



Obrázek č. 1: závislost koeficientu násobení na rozteči pro H₂O, D₂O a grafit

Výroba těžké vody je nákladná a nikdy není možno dosáhnout 100% čistoty. Proto byl v dalším kroku, viz graf č. 2, uvažován poměr lehké a těžké vody 1:1. Moderační i absorpční účinky této směsi jsou mezi hodnotami lehké a těžké vody, přičemž maximum koeficientu se posouvá do vyšších roztečí.



Obrázek č. 2: závislost koeficientu násobení na rozteči pro H_2O , D_2O a směs

4. Závěr

V rámci miniprojektu byl spočítán koeficient násobení pro různé moderátory a různé rozteče v nekonečné mřížce. Lehká voda dle výpočtů je nelepší moderátor pro malé rozteče, naproti tomu je těžká voda nejlepší podle výsledků pro velké rozteče.

5. Poděkování

Chtěli bychom poděkovat panu Bc. Josefu Sabolovi za vedení projektu a jeho cenné rady Katedře jaderných reaktorů ČVUT v Praze za možnost zrealizovat tento projekt v rámci projektu Týden vědy na Jaderce 2024.

6. Reference

[1] <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyriivbni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/technologie-a-zabezpeceni>

[2] <https://www.cs.m.wikipedia.org/wiki/Voda>
<https://www.cs.m.wikipedia.org/wiki/Deuterium>
<https://www.cs.m.wikipedia.org/wiki/Grafit>